

RELATÓRIO – ATIVIDADE #4A

Autor: Eduardo Germer

Objetivos:

- Simulações em bocal de perfil parabólico
- Análise dos resultados com programa Richardson3p2

Data: 22.Nov.2012

Para a realização desta atividade foi definida uma tubeira parabólica cujas características são:

- Razão de áreas (RA): 16
- Raio da garganta (R_g): $4 \cdot 10^{-2}$ m
- Comprimento da tubeira (L): $5 \cdot 10^{-1}$ m
- Raio de entrada = raio de saída
- Entrada da tubeira em $x=0$
- Saída da tubeira em $x=L$
- Posição da garganta em $x=L/2$

Foram abordadas seis situações, que diferem na pressão e temperatura de estagnação. São elas:

- Caso 1: $p_0 = 5d5$ $T_0 = 3d2$
- Caso 2: $p_0 = 1d6$ $T_0 = 3d2$
- Caso 3: $p_0 = 2d6$ $T_0 = 5d2$
- Caso 4: $p_0 = 5d6$ $T_0 = 1d3$
- Caso 5: $p_0 = 1d7$ $T_0 = 2d3$
- Caso 6: $p_0 = 2d7$ $T_0 = 3d3$

As simulações foram feitas com a malha inicial de 2×2 sendo posteriormente refinada com razão de refino constante e igual a 2, em ambas as direções, desta forma as malhas seguintes foram 4×4 , 8×8 e assim por diante.

A geração da malha foi feita de forma uniforme na direção “x” e uniforme (por seção) na direção “r”. A Fig.1 mostra um exemplo de malha, no caso a de 32×32 .

A função de interpolação considerada para todas as simulações foi a UDS, e a condição inicial é a solução analítica 1D.

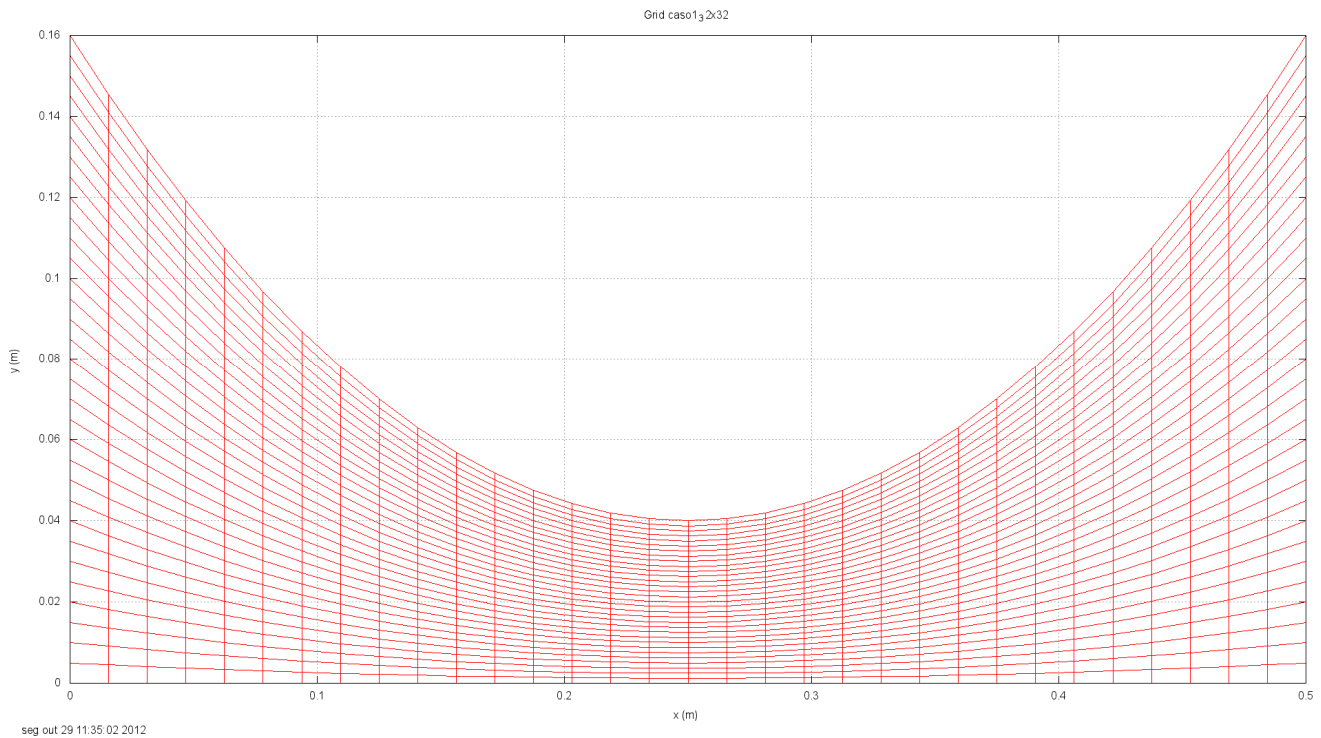


Figura 1 – Tubeira parabólica – malha 32 x 32

Hardware e Software das simulações:

Computador: HP Pavilion dv5-1260, 4GB RAM, 64bit, AMD Turion X-2 Dual Core RM-74, 2.2 GHz

Sistema operacional: Windows 7

Computador: CFD-9, 8GB RAM, 64bit, Intel Core 2 Quad, 2.4 GHz

Sistema operacional: Windows 7

Computador: CFD-21, 2 processadores Xeon (12 núcleos), 192 GB RAM

Sistema operacional: Windows 7

Compilador: Intel Visual Fortran 11.1.065 [Intel 64].

Observação: o computador HP foi utilizado para as malhas 2x2 até 512x512; o computador CFD-9 foi utilizado para malhas 1024x1024, e o computador CFD-21 para a malha 2048x2048.

Programa: Mach2D-5p8 (versão GB DM 2012 10 11)

Dados constantes nas simulações: kg=4; a1=1.d-6; coord=1; Rg=2.869E+02; gamma=1.4d0; pr=101325.d0; g0=9.80665d0; beta1=beta2=0; itb1=itb2=1000; modvis=0; modtur=0; ccTw=0; it1=it2=5; reload=0; tolerance=-1d-10; wbkp=1000; wlf=1; sem_a=1; sem_g=1; w_g=1; w_cam=0; vertela=1; num=1; Eu=3. d0; Ev=-3.d0; Ep=-350.d0; Et=-350.d0.

Para avaliar a ordem aparente foram analisadas duas variáveis, o coeficiente de descarga (adimensional) e o empuxo dinâmico (adimensional). Ao longo do texto referiu-se algumas vezes ao empuxo dinâmico como variável 1 e o coeficiente de descarga como variável 2.

Conforme esperado, a ordem aparente (p_U) da incerteza tende à ordem assintótica (p_L) à medida que a malha é refinada ($h \rightarrow 0$). Isto foi verificado para as duas variáveis e em todos os casos, sendo a ordem assintótica a mesma para ambas, e cujo valor é $p_L = 1$.

A tabela 1 mostra os valores de ordem aparente para cada caso e cada malha, da variável empuxo dinâmico, indicando que esta ordem tende à ordem assintótica à medida que a malha é refinada. O solver utilizado neste caso foi o MSI.

Tabela 1 – Ordem aparente da variável 1 (Empuxo dinâmico adimensionalizado) - MSI

Variável 1 - MSI							
Malha	h	caso 1	caso2	caso3	caso4	caso5	caso6
2x2	2.50E-01						
4x4	1.25E-01						
8x8	6.25E-02						
16x16	3.13E-02	1.30841548408298E-01	1.30841548407438E-01	1.30841548407765E-01	1.30841548408069E-01	1.30841548408836E-01	1.30841548407847E-01
32x32	1.56E-02	1.96927220099180E+00	1.96927220099260E+00	1.96927220099171E+00	1.96927220099104E+00	1.96927220099163E+00	1.96927220099112E+00
64x64	7.81E-03	1.48861030138544E+00	1.48861030137910E+00	1.48861030138165E+00	1.48861030138040E+00	1.48861030138288E+00	1.48861030138621E+00
128x128	3.91E-03	9.50313162698133E-01	9.50313162694251E-01	9.50313162703086E-01	9.50313162700194E-01	9.50313162700098E-01	9.50313162703907E-01
256x256	1.95E-03	8.96992180708245E-01	8.96992180810400E-01	8.96992181353300E-01	8.96992181471297E-01	8.96992181483108E-01	8.96992181457483E-01
512x512	9.77E-04	9.42535435169254E-01	9.42535435076662E-01	9.42535433302139E-01	9.42535433990261E-01	9.42535432926358E-01	9.42535433139569E-01
1024x1024	4.88E-04	9.72302640268573E-01	9.72302640267990E-01		9.72302640794739E-01		
2048x2048	2.44E-04				9.86429930564716E-01		

As Figs. 2, 3, 4, 5, 6 e 7 mostram os resultados da tabela 1 em representação gráfica.

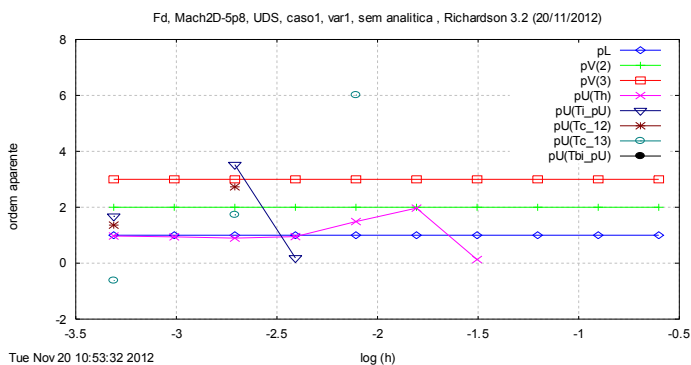


Figura 2 – Ordem aparente: caso 1 / variável 1 / MSI

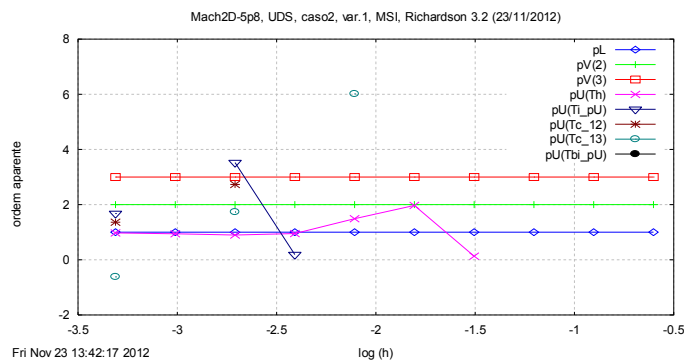


Figura 3 – Ordem aparente: caso 2 / variável 1 / MSI

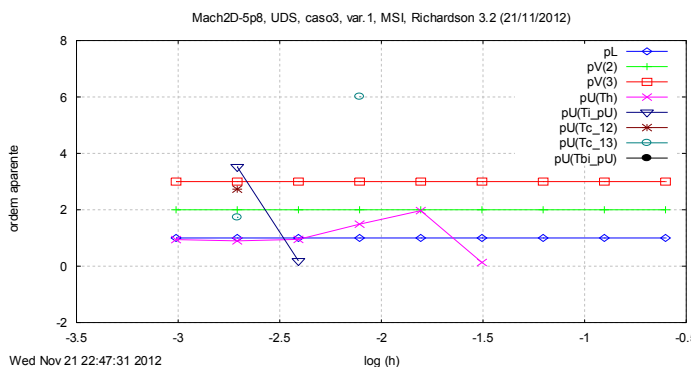


Figura 4 – Ordem aparente: caso 3 / variável 1 / MSI

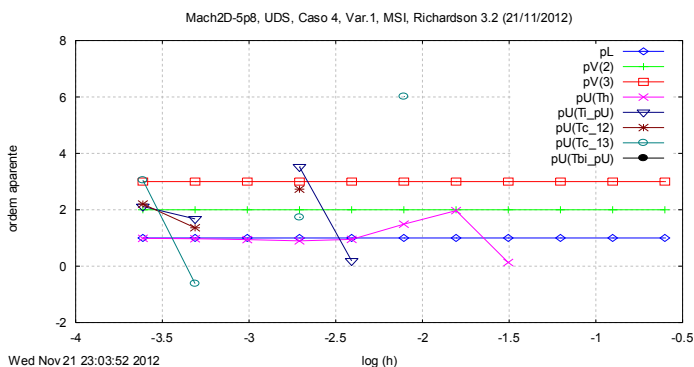


Figura 5 – Ordem aparente: caso 4 / variável 1 / MSI

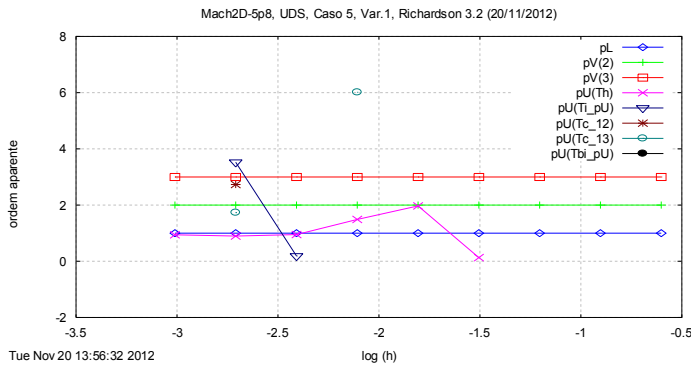


Figura 6 – Ordem aparente: caso 5 / variável 1 / MSI

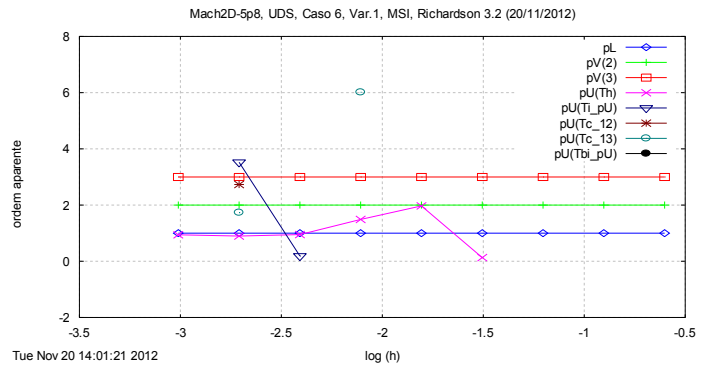


Figura 7 – Ordem aparente: caso 6 / variável 1 / MSI

A tabela 2 mostra os valores de ordem aparente para cada caso e cada malha, do empuxo dinâmico, indicando que esta ordem tende à ordem assintótica à medida que a malha é refinada. O solver utilizado neste caso foi o TDMA.

Tabela 2 – Ordem aparente da variável 1 (Empuxo dinâmico adimensionalizado) - TDMA

Malha	h	Variável 1 - TDMA					
		caso 1	caso2	caso3	caso4	caso5	caso6
2x2	2.50E-01						
4x4	1.25E-01						
8x8	6.25E-02						
16x16	3.13E-02	1.30841548420821E-01			1.30841548411385E-01		1.30841548407520E-01
32x32	1.56E-02	1.96927220098864E+00			1.96927220098931E+00		1.96927220099198E+00
64x64	7.81E-03	1.48861030138307E+00			1.48861030139104E+00		1.48861030138222E+00
128x128	3.91E-03	9.50313162684072E-01			9.50313162691075E-01		9.50313162700735E-01
256x256	1.95E-03	8.96992181545113E-01			8.96992181451561E-01		8.96992181453285E-01
512x512	9.77E-04	9.42535433142018E-01			9.42535433435077E-01		9.42535432599726E-01
1024x1024	4.88E-04				9.72302640770326E-01		
2048x2048							

As Figs. 8, 9 e 10 mostram os resultados da tabela 2 em representação gráfica.

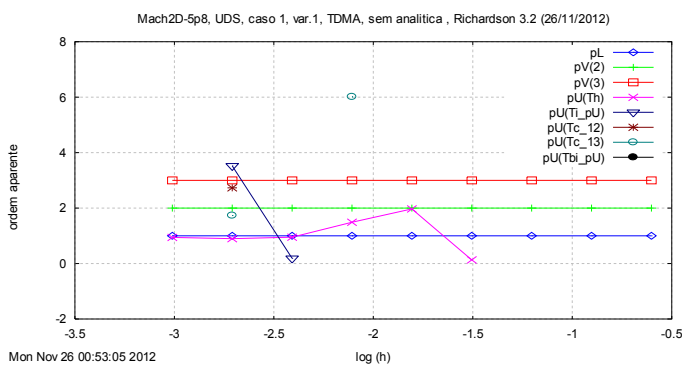


Figura 8–Ordem aparente: caso 1 / variável 1 / TDMA

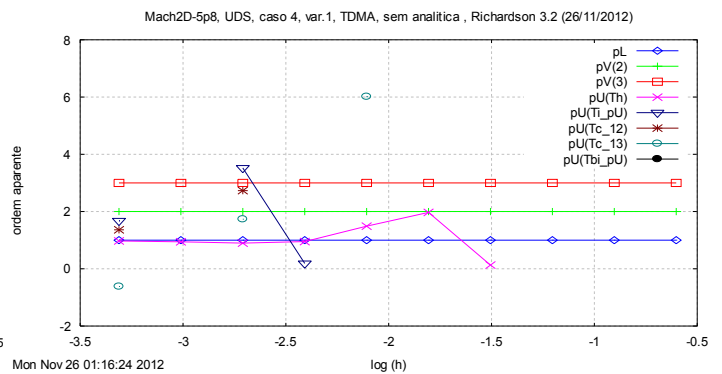


Figura 9– Ordem aparente: caso 4 / variável 1 / TDMA

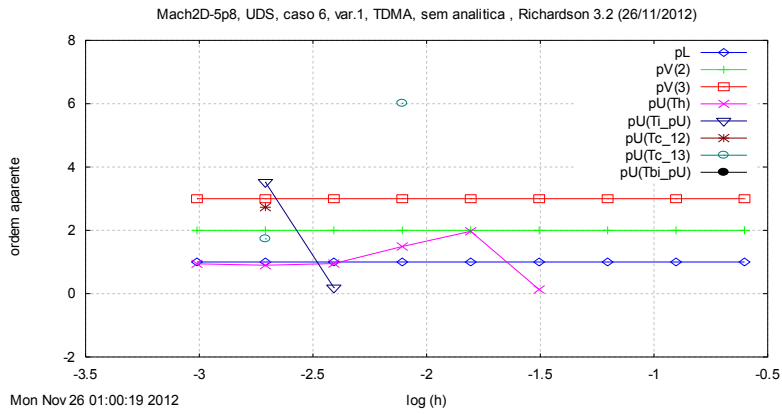


Figura 10 – Ordem aparente: caso 6 / variável 1 / TDMA

A tabela 3 mostra os valores de ordem aparente para cada caso e cada malha, do coeficiente de descarga, indicando que esta ordem tende à ordem assintótica à medida que a malha é refinada. O solver utilizado neste caso foi o MSI.

Tabela 3 – Ordem aparente da variável 2 (Coeficiente de descarga adimensionalizado) - MSI

		Variável 2 - MSI					
Malha	h	caso 1	caso2	caso3	caso4	caso5	caso6
2x2	2.50E-01						
4x4	1.25E-01						
8x8	6.25E-02	-1.53956499049466E+00	-1.53956499048861E+00	-1.53956499049174E+00	-1.53956499048978E+00	-1.53956499049538E+00	-1.53956499049297E+00
16x16	3.13E-02	4.30878733347916E-01	4.30878733346938E-01	4.30878733347526E-01	4.30878733347363E-01	4.30878733348758E-01	4.30878733347613E-01
32x32	1.56E-02	1.06943771333327E+00	1.06943771333340E+00	1.06943771333315E+00	1.06943771333278E+00	1.06943771333310E+00	1.06943771333299E+00
64x64	7.81E-03	1.01430563101383E+00	1.01430563101466E+00	1.01430563101422E+00	1.01430563101542E+00	1.01430563101440E+00	1.01430563101451E+00
128x128	3.91E-03	9.77940086941806E-01	9.77940086949599E-01	9.77940086946006E-01	9.77940086949947E-01	9.77940086946251E-01	9.77940086942965E-01
256x256	1.95E-03	9.81169337399078E-01	9.81169337380266E-01	9.81169337147941E-01	9.81169337110135E-01	9.81169337094987E-01	9.81169337095239E-01
512x512	9.77E-04	9.89056906568776E-01	9.89056906578683E-01	9.89056907293046E-01	9.89056907236382E-01	9.89056907451162E-01	9.89056907365333E-01
1024x1024	4.88E-04	9.94031292131192E-01	9.94031292131192E-01		9.94031292033611E-01		
2048x2048					9.96733663595047E-01		

As Figs. 11, 12, 13, 14, 15 e 16 mostram os resultados da tabela 3 em representação gráfica.

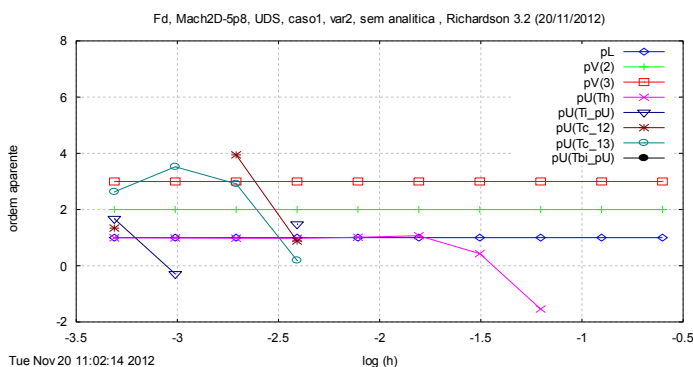


Figura 11 – Ordem aparente: caso 1 / variável 2 / MSI

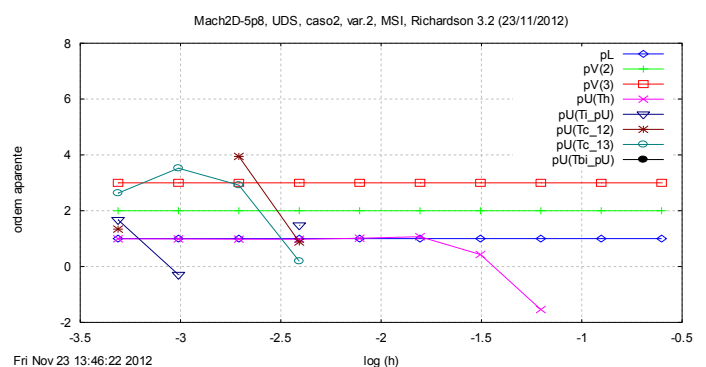


Figura 12 – Ordem aparente: caso 2 / variável 2 / MSI

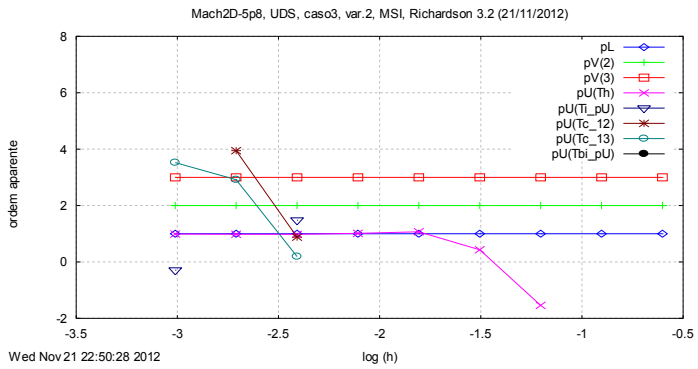


Figura 13 – Ordem aparente: caso 3 / variável 2 / MSI

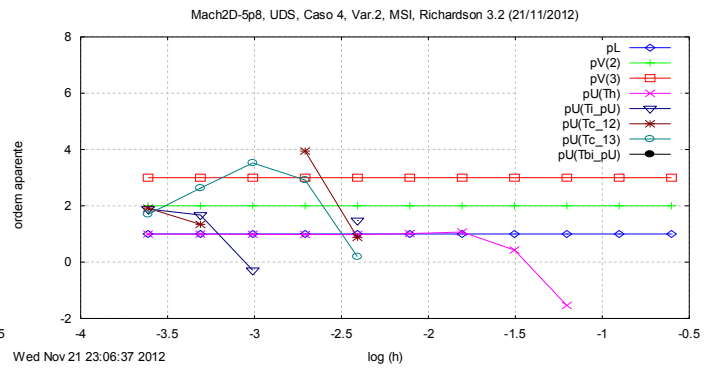


Figura 14 – Ordem aparente: caso 4 / variável 2 / MSI

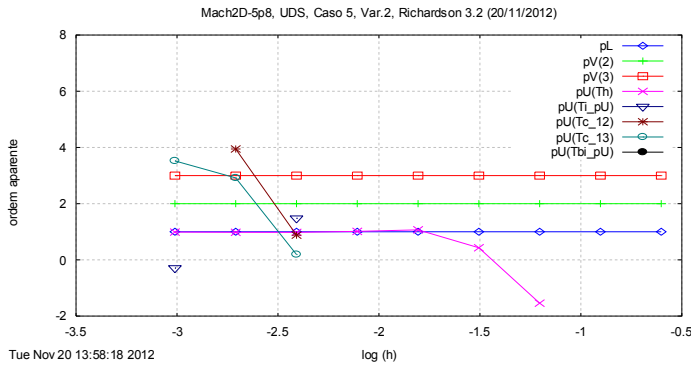


Figura 15 – Ordem aparente: caso 5 / variável 2 / MSI

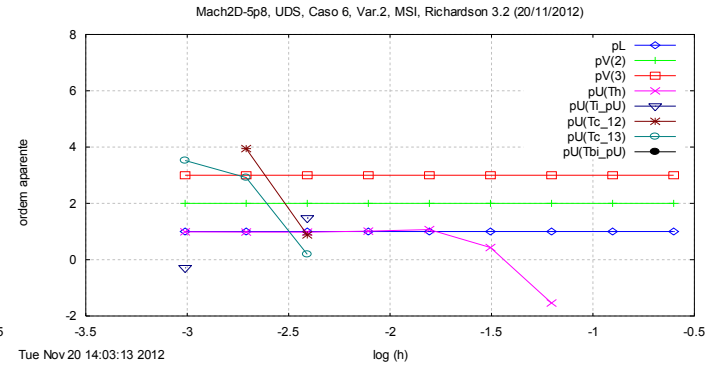


Figura 16 – Ordem aparente: caso 6 / variável 2 / MSI

A tabela 4 mostra os valores de ordem aparente para cada caso e cada malha, do coeficiente de descarga, indicando que esta ordem tende à ordem assintótica à medida que a malha é refinada. O solver utilizado neste caso foi o TDMA.

Tabela 4 – Ordem aparente da variável 2 (Coeficiente de descarga adimensionalizado) – TDMA

		Variável 2 - TDMA					
Malha	h	caso 1	caso2	caso3	caso4	caso5	caso6
2x2	2.50E-01						
4x4	1.25E-01						
8x8	6.25E-02	-1.53956499053056E+00			-1.53956499050339E+00		-1.53956499049158E+00
16x16	3.13E-02	4.30878733359151E-01			4.30878733350931E-01		4.30878733346958E-01
32x32	1.56E-02	1.06943771333180E+00			1.06943771333231E+00		1.06943771333335E+00
64x64	7.81E-03	1.01430563102133E+00			1.01430563101756E+00		1.01430563101325E+00
128x128	3.91E-03	9.77940086968837E-01			9.77940086947906E-01		9.77940086942770E-01
256x256	1.95E-03	9.81169337084630E-01			9.81169337115998E-01		9.81169337101395E-01
512x512	9.77E-04	9.89056907292884E-01			9.89056907218061E-01		9.89056907603329E-01
1024x1024	4.88E-04				9.94031292046351E-01		
2048x2048							

As Figs. 17, 18 e 19 mostram os resultados da tabela 4 em representação gráfica.

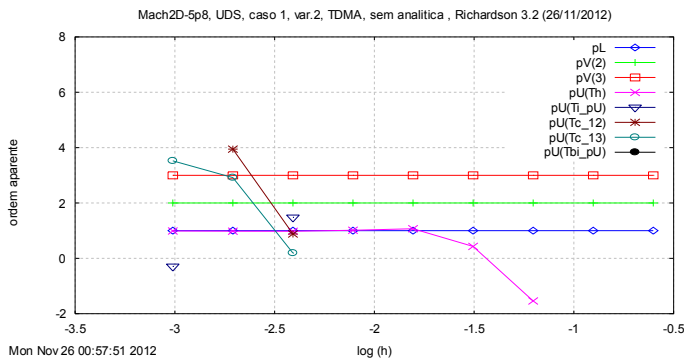


Figura 17 – Ordem aparente: caso 1 / variável 2 / TDMA

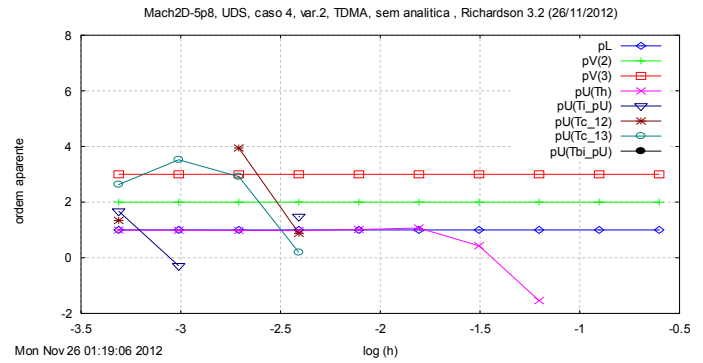


Figura 18 – Ordem aparente: caso 4 / variável 2 / TDMA

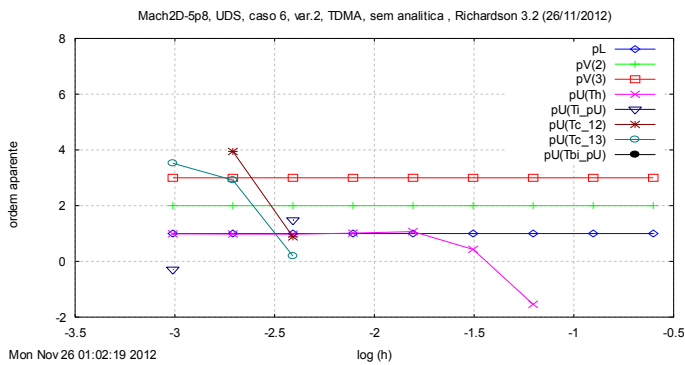


Figura 19 – Ordem aparente: caso 6 / variável 2 / TDMA

Conclusões:

Conforme esperado, as variações das condições de estagnação não afetam de forma significativa¹ a tendência da ordem aparente à ordem assintótica à medida que a malha é refinada. Isto foi verificado para as duas variáveis e para todos os casos analisados.

Também foi possível verificar que o solver não afeta esta tendência, como esperado.

Os valores dos parâmetros para solução como o “dt” não foram otimizados, ou seja, não houve preocupação em obter os melhores valores para cada simulação, e o critério de parada das simulações foi a estabilização do termo dFd^* . Sendo a estabilização definida por um contador de “zeros” para o valor de dFd^* , e no momento de surgimento do décimo quinto zero o programa é finalizado.

Pôde-se verificar que o valor máximo possível para “dt” vai reduzindo à medida que a malha é refinada, tendo variado de $5d^{-5}$ (malha mais grossa) até $1d^{-6}$ (malha mais fina).

No anexo I encontram-se os demais dados das simulações e no anexo II alguns outros gráficos resultantes do Richardson 3p2.

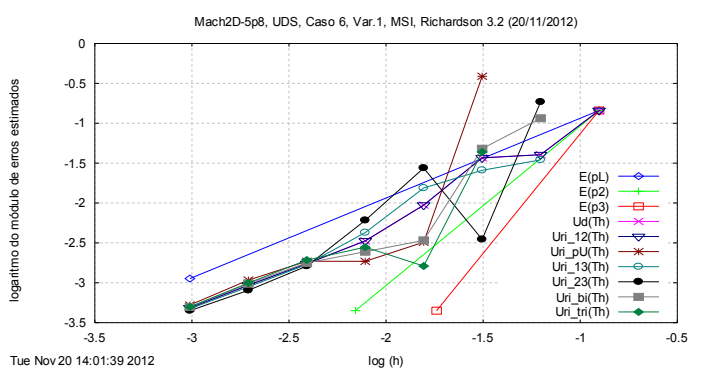
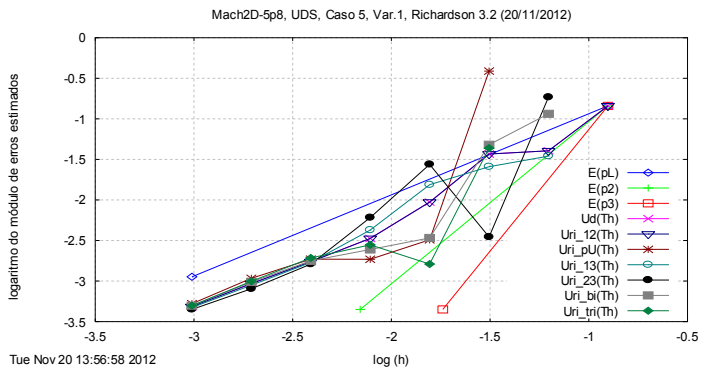
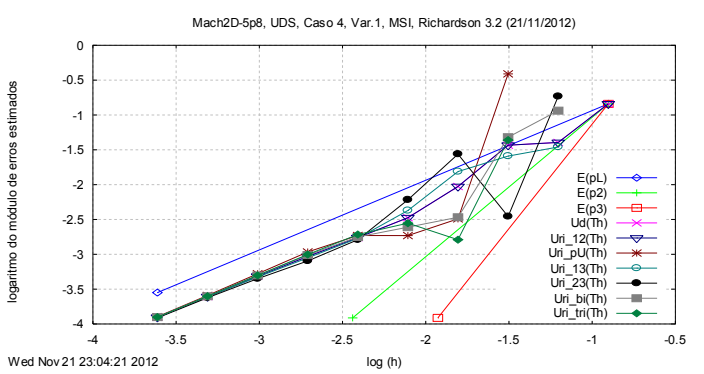
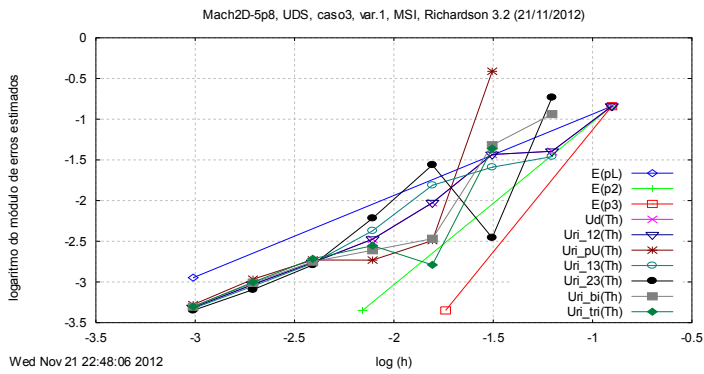
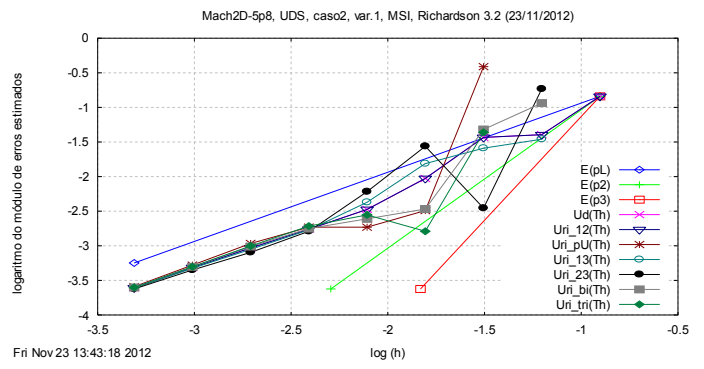
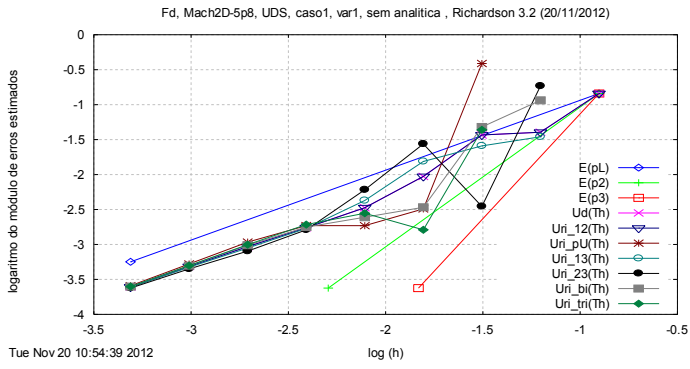
¹ A ordem aparente variou, entre os casos, aproximadamente no décimo algarismo significativo.

ANEXO I

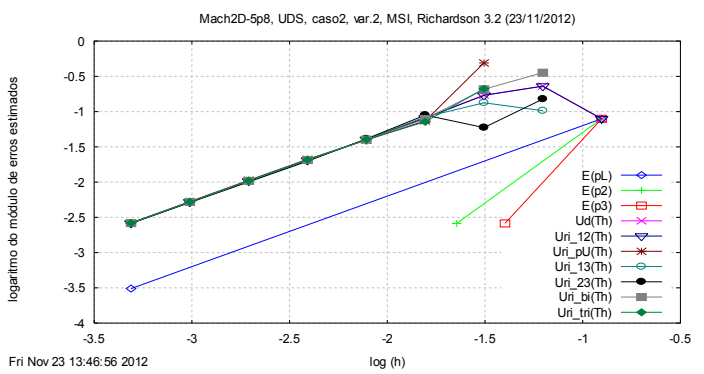
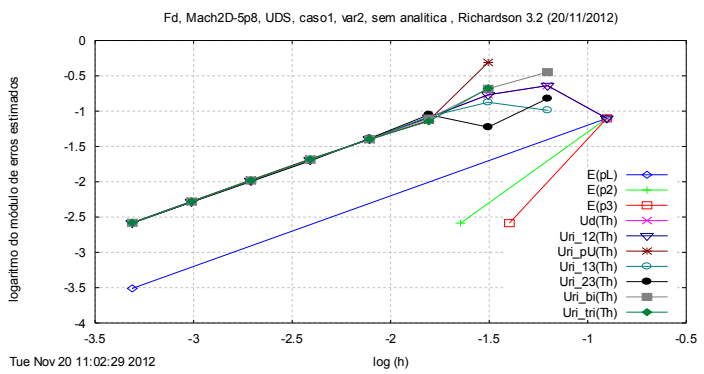
	Simulação	Malha	p0	T0	dt1=dt2	Cd	Fd*	it	t CPU	Memória	Solver	itmax	imax	nitm_u	nitm_p
Caso 1 - MSI	EG_4_1	2x2	5d5	3d2	2d-5	1.64127853669218E+00	8.50335000850672E-01	6194	6.08E-01	1.28	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_2	4x4	5d5	3d2	2d-5	1.56224857263982E+00	9.94839469634430E-01	3532	5.62E-01	1.28	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_3	8x8	5d5	3d2	2d-5	1.33250306568558E+00	9.54502149921607E-01	3253	1.17E+00	1.3	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_4	16x16	5d5	3d2	2d-5	1.16207559307799E+00	9.17662134222849E-01	2843	3.07E+00	1.58	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_5	32x32	5d5	3d2	2d-5	1.08086610489857E+00	9.08253863527353E-01	2532	1.26E+01	2.48	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_6	64x64	5d5	3d2	2d-5	1.04066200405412E+00	9.04901173119671E-01	2341	4.65E+01	5.67	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_7	128x128	5d5	3d2	2d-5	1.02025021584270E+00	9.03166088401858E-01	2199	1.91E+02	18.57	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_8	256x256	5d5	3d2	5d-6	1.00991023695171E+00	9.02234338979080E-01	6851	2.45E+03	70.03	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_9	512x512	5d5	3d2	5d-6	1.00470088313075E+00	9.01749533304639E-01	7033	1.69E+04	272.5	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_10	1024x1024	5d5	3d2	2d-6	1.00208540784704E+00	9.01502431774432E-01	31500	1.31E+05	270	MSI	70000	6	2	4
Caso 2 - MSI	EG_4_11	2x2	1d6	3d2	5d-5	1.64127853669215E+00	8.50335000850716E-01	2131	2.62E-01	1.28	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_12	4x4	1d6	3d2	9.7d-6	1.56224857263952E+00	9.94839469634375E-01	8316	1.48E+00	1.28	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_13	8x8	1d6	3d2	9.7d-6	1.33250306568546E+00	9.54502149921571E-01	6426	2.26E+00	1.3	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_14	16x16	1d6	3d2	9.7d-6	1.16207559307789E+00	9.17662134222810E-01	5582	6.08E+00	1.58	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_15	32x32	1d6	3d2	9.7d-6	1.08086610489848E+00	9.08253863527318E-01	4961	2.27E+01	2.48	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_16	64x64	1d6	3d2	9.7d-6	1.04066200405407E+00	9.04901173119622E-01	4573	9.67E+01	5.67	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_17	128x128	1d6	3d2	9.7d-6	1.02025021584278E+00	9.03166088401799E-01	4208	3.84E+02	18.57	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_18	256x256	1d6	3d2	5d-6	1.00991023695171E+00	9.02234338979080E-01	6852	2.53E+03	70.03	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_19	512x512	1d6	3d2	5d-6	1.00470088313075E+00	9.01749533304639E-01	7033	1.60E+04	272.5	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_20	1024x1024	1d6	3d2	3d-6	1.00208540784704E+00	9.01502431774432E-01	19350	8.29E+04	270	MSI	70000	6	2	4
Caso 3 - MSI	EG_4_21	2x2	2d6	5d2	5d-5	1.64127853669218E+00	8.50335000850701E-01	1704	2.26E-01	1.28	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_22	4x4	2d6	5d2	9.7d-6	1.56224857263968E+00	9.94839469634397E-01	6304	9.36E-01	1.28	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_23	8x8	2d6	5d2	9.7d-6	1.33250306568552E+00	9.54502149921589E-01	5049	1.98E+00	1.3	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_24	16x16	2d6	5d2	9.7d-6	1.16207559307794E+00	9.17662134222831E-01	4411	5.09E+00	1.58	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_25	32x32	2d6	5d2	9.7d-6	1.08086610489852E+00	9.08253863527334E-01	3912	1.95E+01	2.48	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_26	64x64	2d6	5d2	9.7d-6	1.04066200405409E+00	9.04901173119643E-01	3601	7.52E+01	5.67	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_27	128x128	2d6	5d2	9.7d-6	1.02025021584273E+00	9.03166088401832E-01	3358	3.09E+02	18.57	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_28	256x256	2d6	5d2	5.35d-6	1.00991023694998E+00	9.02234338979470E-01	5433	2.37E+03	70.03	MSI	10000	6	2	4
	EG_4_29	512x512	2d6	5d2	5.35d-6	1.00470088313074E+00	9.01749533304619E-01	5136	1.39E+04	272.5	MSI	10000	6	2	4
	EG_4_30	1024x1024	2d6	5d2							MSI				
Caso 4 - MSI	EG_4_31	2x2	5d6	1d3	5d-5	1.64127853669218E+00	8.50335000850696E-01	1230	1.07E-01	1.28	MSI	10000	6	2	2
	EG_4_22	4x4	5d6	1d3	5.35d-6	1.56224857263954E+00	9.94839469634376E-01	8261	1.41E+00	1.28	MSI	10000	6	2	4
	EG_4_23	8x8	5d6	1d3	5.35d-6	1.33250306568543E+00	9.54502149921564E-01	6353	2.25E+00	1.3	MSI	10000	6	2	4
	EG_4_24	16x16	5d6	1d3	5.35d-6	1.16207559307789E+00	9.17662134222810E-01	5545	6.06E+00	1.58	MSI	10000	6	2	4
	EG_4_25	32x32	5d6	1d3	5.35d-6	1.08086610489846E+00	9.08253863527310E-01	4895	2.38E+01	2.48	MSI	10000	6	2	4
	EG_4_26	64x64	5d6	1d3	5.35d-6	1.04066200405406E+00	9.04901173119615E-01	4517	8.98E+01	5.67	MSI	10000	6	2	4
	EG_4_27	128x128	5d6	1d3	5.35d-6	1.02025021584278E+00	9.03166088401798E-01	4178	3.91E+02	18.57	MSI	10000	6	2	4
	EG_4_28	256x256	5d6	1d3	5.35d-6	1.00991023694978E+00	9.02234338979510E-01	3909	1.70E+03	70.03	MSI	10000	6	2	4
	EG_4_29	512x512	5d6	1d3	3d-6	1.00470088313023E+00	9.01749533304726E-01	10200	1.08E+04	272.5	MSI	70000	6	2	4
	EG_4_30	1024x1024	5d6	1d3	1d-6	1.00208540784703E+00	9.01502431774435E-01	34450	1.42E+05	270	MSI	70000	6	2	4
EG_4_31	2048x2048	5d6	1d3	1d-6	1.00077470606537E+00	9.01377713401267E-01	339450	4.12E+05		MSI	70000	6	2	4	
Caso 5 - MSI	EG_4_32	2x2	1d7	2d3	5.35d-6	1.64127853669225E+00	8.50335000850754E-01	9046	8.43E-01	1.28	MSI	10000	6	2	4
	EG_4_33	4x4	1d7	2d3	5.35d-6	1.56224857263988E+00	9.94839469634431E-01	5641	8.89E-01	1.28	MSI	10000	6	2	4
	EG_4_34	8x8	1d7	2d3	5.35d-6	1.33250306568552E+00	9.54502149921590E-01	4578	1.56E+00	1.3	MSI	10000	6	2	4
	EG_4_35	16x16	1d7	2d3	5.35d-6	1.16207559307794E+00	9.17662134222830E-01	4002	4.30E+00	1.58	MSI	10000	6	2	4
	EG_4_36	32x32	1d7	2d3	5.35d-6	1.08086610489852E+00	9.08253863527333E-01	3540	1.68E+01	2.48	MSI	10000	6	2	4
	EG_4_37	64x64	1d7	2d3	5.35d-6	1.04066200405408E+00	9.04901173119644E-01	3268	6.69E+01	5.67	MSI	10000	6	2	4
	EG_4_38	128x128	1d7	2d3	5.35d-6	1.02025021584274E+00	9.03166088401831E-01	3042	2.92E+02	18.57	MSI	10000	6	2	4
	EG_4_39	256x256	1d7	2d3	5.35d-6	1.00991023694960E+00	9.02234338979552E-01	2888	1.24E+03	70.03	MSI	10000	6	2	4
	EG_4_40	512x512	1d7	2d3	3d-6	1.00470088313075E+00	9.01749533304617E-01	4763	1.28E+04	272.5	MSI	10000	6	2	4
	EG_4_41	1024x1024	1d7	2d3							MSI				

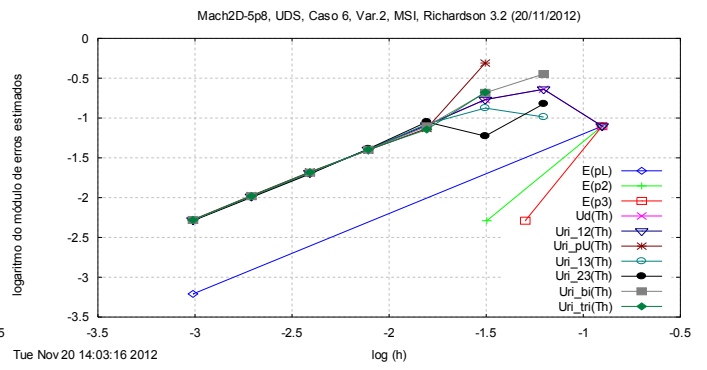
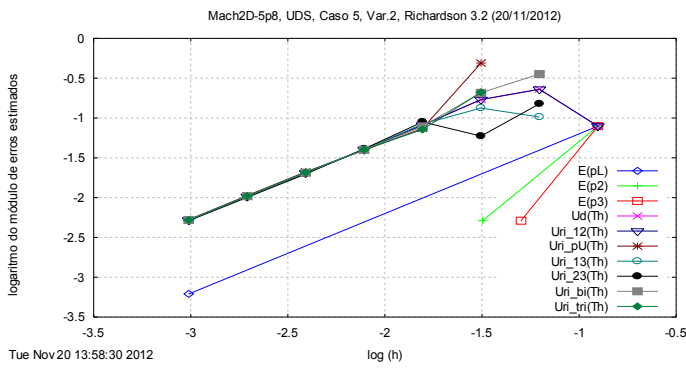
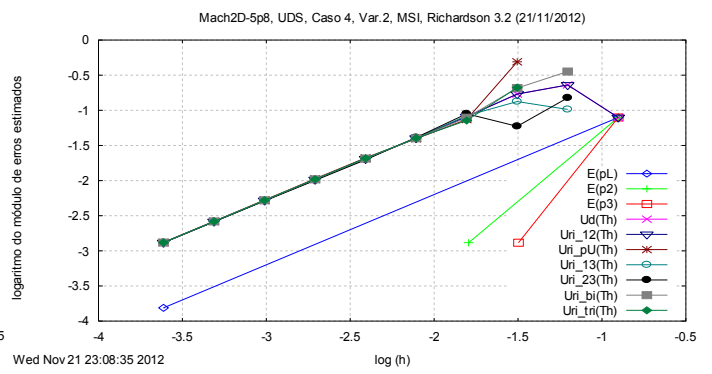
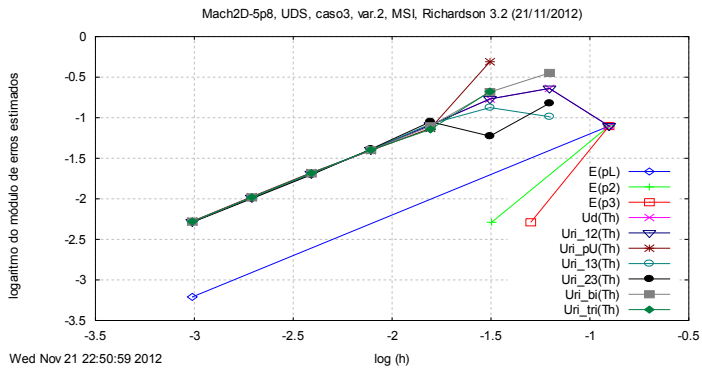
ANEXO II

Variável 1 - MSI:

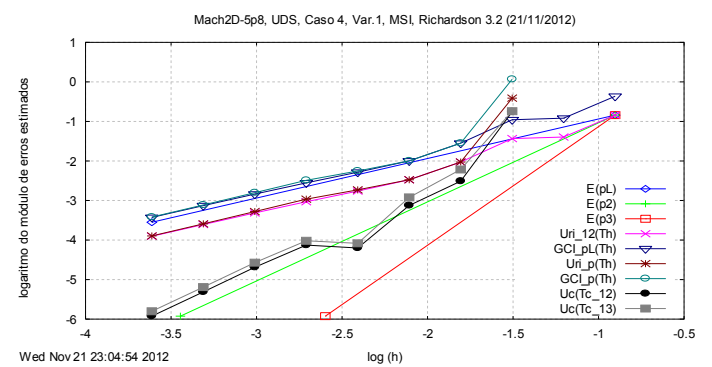
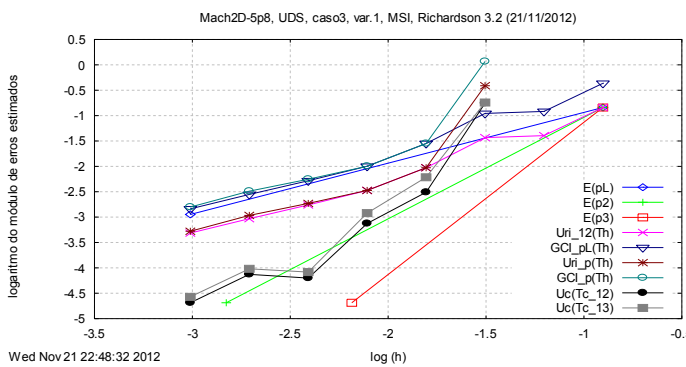
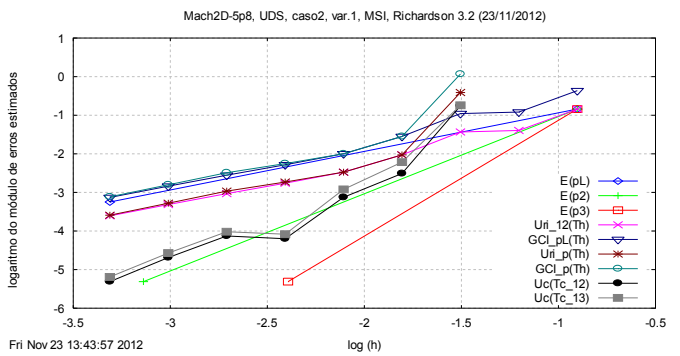
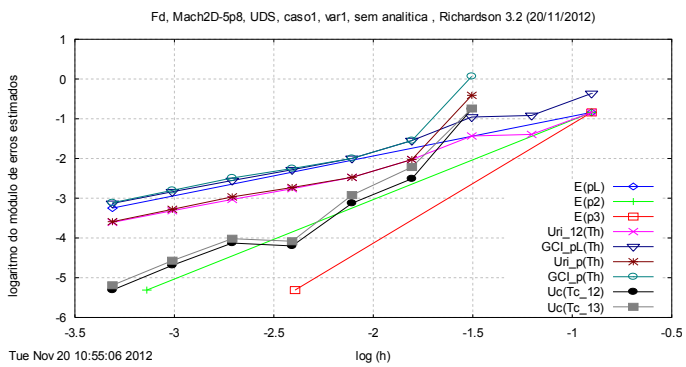


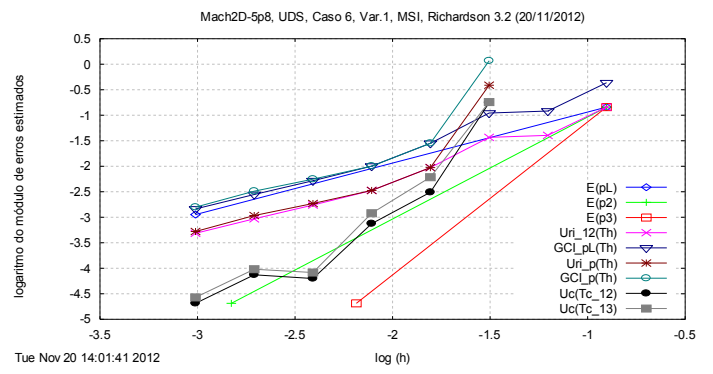
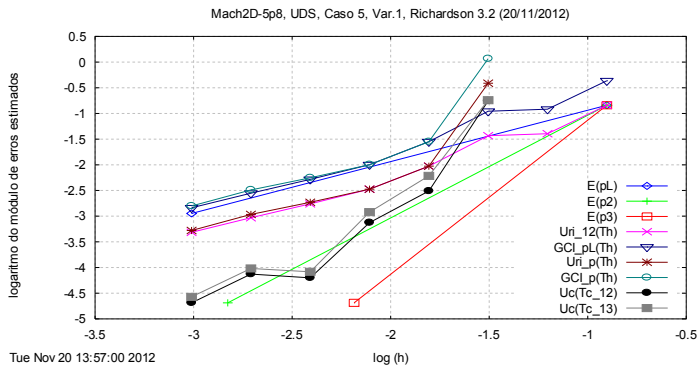
Variável 2 - MSI:





Variável 1 - MSI:





Variável 2 – MSI:

